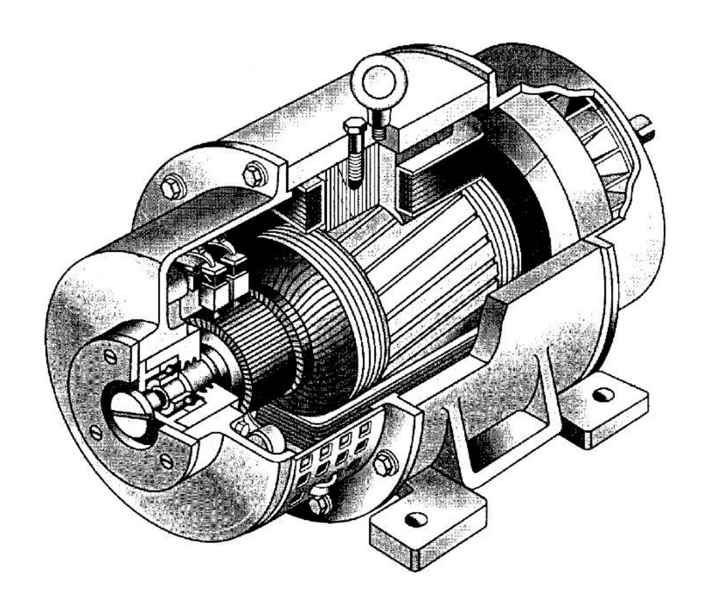
Расчет коллекторного электродвигателя при перемотке



Источник:

Кокорев А. С. "Справочник молодого обмотчика электрических машин" 1985 г.

Rev. 04 26 Oct 2020

1. Расчет обмотки якоря машины постоянного тока мощностью 1–10 кВт*.
общего назначения.

Среднее значение напряжения между коллекторными пластинами:

$$U_{\text{К}\cdot\text{СР}} = \frac{2p \times U}{K}$$

где: $2p$ – число полюсов; U – номинальное напряжение машины, *в*; K – число коллекторных пластин. Допускаемые максимальные значения $U_{\text{К.СР}} < 16$ *в*. При больших значениях появляется повышенное искрение на коллекторе. Линейную нагрузку А** и магнитную индукцию $B\delta$ в воздушном зазоре якоря выбирают в зависимости от его наружного диаметра $D_{\text{Я}}$ (табл. 1).

Таблица 1. Нагрузка и магнитная индукция
в воздушном зазоре якоря.

$D_{\text{Я}}$, *см.*	А, $A/см.$	$B\delta$, *Тл*
8	100	0,45
10	130	0,52
12	150	0,56
15	180	0,63
20	240	0,70

Номинальная мощность (*кВт*):

$$P = D_{\text{я}}^2 \times l_{\text{я}} \times n \times A \times B\delta \times 10^{-8}$$

($10^{-8} = 0{,}00000001$)

где: $D_я$ – диаметр якоря в квадрате, $l_{\text{Я}}$ – длина сердечника якоря, *см.*; n – частота вращения якоря, *об. мин.*, здесь A – линейная нагрузка $A/см.$, $B\delta$ – индукця в воздушном зазоре.

Номинальный ток якоря (А) генератора:

$$I_{\text{Я}} = \frac{P}{U \times 10^3}$$

двигателя:

$$I_{\text{Я}} = 1{,}15 \times \frac{P}{U} \times 10^3$$

($10^3 = 1000$)

Число эффективных проводников обмотки (предварительно):

$$N_{\text{Я}} = \frac{3{,}14 \times D_{\text{Я}} \times A}{I_{\text{Я}}} \times 2a$$

Число витков в секции якоря:

$$w_{\text{C}} \approx \frac{N_{\text{Я}}}{2 \times K}$$

где; K – количество пластин коллектора, $2a$ – число параллельных ветвей.

У двигателей с полузакрытыми пазами и всыпной обмоткой число w_{C} может быть целым или дробным, так как в такой обмотке допускают разные числа витков в секциях, расположенных рядом в одном пазу. Например, при трех секциях в пазе ($u = 3$) и числе витков в секциях 3–4–3 среднее значение $w_{\text{C}} = 3{,}33$.
Уточненное число эффективных проводников обмотки:

$$N_{\text{Я}} = 2 \times w_{\text{C}} \times K$$

Число эффективных проводов в пазе:

$$N_{\Pi} = \frac{2 \times w_{C} \times K}{z}$$

где z – число пазов.

* Обмоточные данные машин мощностью выше 10 *кВт* при ремонте определяют по старой обмотке, которая выполняется из провода прямоугольного сечения.

** Линейная нагрузка – это отношение тока всех проводников в пазах к длине окружности якоря:

$$A = \frac{I_{Я} \times N_{Я}}{2a \times 3{,}14 \times D_{Я}}$$

где: $I_{Я}$ – ток якоря; $N_{Я}$ – число эффективных проводов обмотки якоря; $2a$ – число параллельных ветвей, $D_{Я}$ – диаметр якоря.

Площадь поперечного сечения паза (рис. 1), *мм*^{2}:

$$F = 1{,}57 \times (r_1^2 + r_2^2) + (r_1 + r_2) \times h$$

Периметр паза (*мм.*):

$$\Pi = 6{,}28 \times r_1 + 3{,}14 \times r_2 + 2 \times h$$

Площадь поперечного сечения пазовой коробки, *мм*^{2}:

$$F_{КОР} = b_{ИЗ} \times \Pi$$

где: $b_{ИЗ}$ – толщина пазовой коробки, *мм*. В современных машинах $b_{ИЗ}$ = 0,35 *мм*. при $D_{Я}$ до 125 *мм*. и $b_{ИЗ}$ = 0,5 *мм*. при $D_{Я}$ больше 125 *мм*.

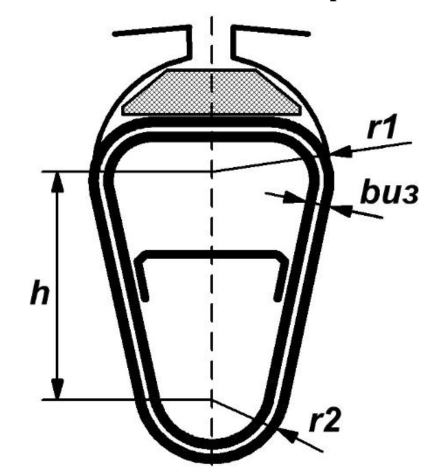


Рис. 1. Полузакрытый паз якоря с изоляцией.

Площадь сечения пазового клина и изоляционной прокладки между слоями проводников, *мм*^{2}:

$$F_{КЛ} \approx (3 \div 5) \times r_1$$

Меньшие значения площади принимают при креплении обмотки пазовой крышкой вместо клина.

Площадь поперечного сечения паза, заполненного обмоткой, *мм*^{2}:

$$F_0 = F - F_{КОР} - F_{КЛ}$$

Диаметр изолированного, провода, мм:

$$D_{ИЗ} = 0{,}86 \times \sqrt{\frac{F_0}{N_{\Pi} \times n_{ЭЛ}}}$$

где: $n_{ЭЛ}$ – число элементарных (параллельных) проводников. N_{Π} – число эффективных проводов в пазу. Диаметр d (*мм.*) провода без изоляции выбирают из ряда стандартов проводов, в зависимости от марки. Проводом большого диаметра выполнять обмотку трудно. Для всыпных обмоток якорей машин постоянного тока применяют провода $d <$ 1,7 ÷ 1,9 *мм*. Если по расчету диаметр получается больше, следует эффективный проводник разделить на два или несколько элементарных (параллельных) проводников.

Коэффициент заполнения паза изолированными проводниками:

$$k_3 = \frac{N_{\Pi} \times n_{ЭЛ} \times D_1^2}{F_0}$$

где: D_1 – диаметр изолированного провода после выбора провода, *мм.*, $k_З$ должен быть не более 0,75, чтобы обеспечить нормальную укладку обмотки в паз. Средняя длина проводника (полувитка) обмотки якоря, сантиметров, при:

$$2p = 2 \quad l_{ПВ} = l_Я + 1{,}4 \times D_Я$$
$$2p = 4 \quad l_{ПВ} = l_Я + D_Я$$

Общая длина провода на обмотку (сантиметров):

$$L = N_Я \times l_{ПВ} \times n_{ЭЛ}$$

Сопротивление обмотки якоря при 20°С, Ом:

$$r_Я = \frac{L}{5700 \times S_{ЭЛ} \times (2a \times n_{ЭЛ})^2}$$

где $S_{ЭЛ}$ – сечение элементарного проводника обмотки, $мм^2$. $2a$ – число параллельных ветвей, $n_{ЭЛ}$ – число элементарных (параллельных) проводников.
Масса (*кг.*) меди провода обмотки:

$$M = 8{,}9 \times L \times S_{ЭЛ} \times 10^{-5}$$

($10^{-5} = 0{,}00001$)

Пример. Рассчитать обмотку якоря электродвигателя постоянного тока. Исходные данные: $D_Я = 16{,}2$ *см.*; $l_Я = 10$ *см.*; $U = 220$ *в*; $n = 1500$ *об. мин.*; $2p = 4$; $z = 31$; $K = 93$; $r_2 = 2$ *мм.*; $r_1 = 4{,}5$ *мм.*; $h = 20{,}5$ *мм.*; класс изоляции А.
Среднее значение напряжения между коллекторными пластинами:

$$U_{К\cdot СР} = \frac{4 \times 220}{93} = 9{,}5В < 16 \text{ в}$$

Линейная нагрузка: $A = 195$ *А/см.* (по таблице 1)
Магнитная индукция в воздушном зазоре: $B\delta = 0{,}65$ *Тл.* (по таблице 1)
Номинальная мощность: $P = 16{,}2^2 \times 10 \times 1500 \times 195 \times 0{,}65 \times 10^{-8} = 5$ кВт.
Номинальный ток:

$$I_Я = 1{,}15 \times \frac{5}{220} \times 10^3 = 26{,}1 \text{ А}$$

Число эффективных проводников обмотки:

$$N_Я = \frac{3{,}14 \times 16{,}2 \times 195}{26{,}1} \times 2 = 760$$

Выбираем простую волновую обмотку с числом параллельных ветвей $2a = 2$, так как симметричная петлевая обмотка при $2p = 4$ и $z = 31$ невыполнима.
Число витков в секции якоря:

$$w_С = \frac{760}{2 \times 93} \approx 4$$

Уточненное число проводников обмотки якоря: $N_Я = 4 \times 2 \times 93 = 744$
Число эффективных проводников в пазе:

$$N_П = \frac{2 \times 4 \times 93}{31} = 24$$

Расчет шагов обмотки приведен на стр. 15 в таб. 5. Шаги обмотки:

$$y_Z = \frac{z}{2p} \pm \varepsilon = \frac{31}{4} + \frac{1}{4} = 8 \qquad y_1 = y_Z \times u = \frac{y_Z \times K}{z} = \frac{8 \times 93}{31} = 24$$

$$y = \frac{K \pm 1}{p} = \frac{93 - 1}{2} = 46 \qquad y_2 = y - y_1 = 46 - 24 = 22$$

$u = K/\text{z}$ – число элементарных пазов в одном реальном пазу, число элементарных пазов якоря равно числу коллекторных пластин $u = K$.

Площадь поперечного сечения паза: $F = 1{,}57 \times (2^2 + 4{,}5^2) + (2 + 4{,}5) \times 20{,}5 = 171$ мм^2.
Периметр паза: $\Pi = 6{,}28 \times 4{,}5 + 3{,}14 \times 2 + 2 \times 20{,}5 = 75{,}6$ мм.
Площадь поперечного сечения пазовой коробки: $F_{\text{КОР}} = 0{,}5 \times 75{,}6 = 37{,}8$ мм^2
Площадь сечения пазового клина и изоляционной прокладки между слоями:

$$F_{\text{КЛ}} = (3 \div 5) \times 4{,}5 \approx 20 \text{ мм}^2$$

Площадь поперечного сечения паза, заполненного обмоткой:

$$F_0 = 171 – 37{,}8 – 20 = 113 \text{ мм}^2$$

Диаметр изолированного провода при $n_{\text{эл}} = 1$:

$$D_{\text{ИЗ}} = 0{,}86 \times \sqrt{\frac{113}{24 \times 1}} = 1{,}87 \text{ мм.}$$

Для уменьшения жесткости обмотки целесообразно увеличить число параллельных проводников. При $n_{\text{эл}} = 2$ получим:

$$D_{\text{ИЗ}} = 0{,}86 \times \sqrt{\frac{113}{24 \times 2}} = 1{,}32 \text{ мм.}$$

Марка провода ПЭВ–2, диаметр по меди $d = 1{,}2$ *мм.*, $D = 1{,}31$ *мм.*, сечение жилы $S_{\text{эл}} = 1{,}13$ *мм*^{2}. Коэффициент заполнения паза изолированными проводниками:

$$k_3 = \frac{24 \times 2 \times 1{,}31^2}{113} = 0{,}73 < 0{,}75$$

Средняя длина проводника (полувитка) обмотки якоря:

$$l_{\text{ПВ}} = 10 + 16{,}2 = 26{,}2 \text{ см.}$$

Общая длина провода на обмотку:

$$L = 744 \times 26{,}2 \times 2 = 38900 \text{ см.}$$

Сопротивление обмотки якоря при 20°C:

$$r_{\text{Я}} = \frac{38900}{5700 \times 1{,}13 \times (2 \times 2)^2} = 0{,}378 \text{ ом.}$$

Масса меди провода обмотки: $M = 8{,}9 \times 38900 \times 1{,}13 \times 10^{-5} = 3{,}91$ кг.

2. Расчет обмоток микродвигателя постоянного тока
(для двигателей длительного, свыше 5 минут режима работы).

Условный объем сердечника якоря, *см*³:

$$V_Я = D_Я^2 \times l$$

где $D_Я$ – диаметр якоря, см; l – длина сердечника якоря, *см*. Мощность электродвигателя P_2 (*Вт*) определяем по рис. 2. Данные на рис. 2 приведены для электродвигателей длительного режима работы с интенсивным охлаждением. При естественном охлаждении (отсутствует вентилятор) полученное значение мощности следует умножить на 0,7 ÷ 0,5. Индукцию в воздушном зазоре Bδ (*Тл*) определяют по табл. 2 в зависимости от отношения мощности P_2 (*Вт*) к частоте вращения *n* (*об. мин.*) см. формулу ниже.

$$\frac{P_2}{n \times 10^{-3}} = \text{значение}$$

(10^{-3} = 0,001)

Таблица 2.
Значение индукции
в воздушном зазоре.

P_2 / $n \times 10^{-3}$, *Вт/об. мин.*	Bδ, *Тл*
4	0,3
10	0,33
30	0,36
60	0,40
120	0,45
200	0,48

Таблица 3.
Значение кпд η.

P_2, *Вт*	η
10	0,37
20	0,45
40	0,51
100	0,59
200	0,63
400	0,70
1000	0,76

Магнитный поток в воздушном зазоре, *В*б:

$$\Phi\delta = B\delta \times b_0 \times l_Я \times 10^{-4}$$

(10^{-4} = 0,0001)

где b_0 – длина полюсной дуги (рис. 3), измеряется по внутренней поверхности полюсного наконечника с помощью гибкой линейки или полоски бумаги.

ЭДС якоря электродвигателя, *в*:

$$E = 0{,}33 \times (1 + 2 \times \eta) \times U - \text{ при последовательном возбуждении.}$$
$$E = 0{,}30 \times (1 + 2 \times \eta) \times U - \text{ при параллельном возбуждении.}$$

где η –кпд (по табл. 3), U – напряжение (*в*).

Число проводников обмотки якоря:

$$N_Я = \frac{60 \times a \times E}{p \times n \times \Phi\delta}$$

где, a = 1 – число параллельных ветвей; p – число пар полюсов. Фδ – магнитный поток в воздушном зазоре, E – ЭДС якоря, *в*, n – оборотов в минуту.

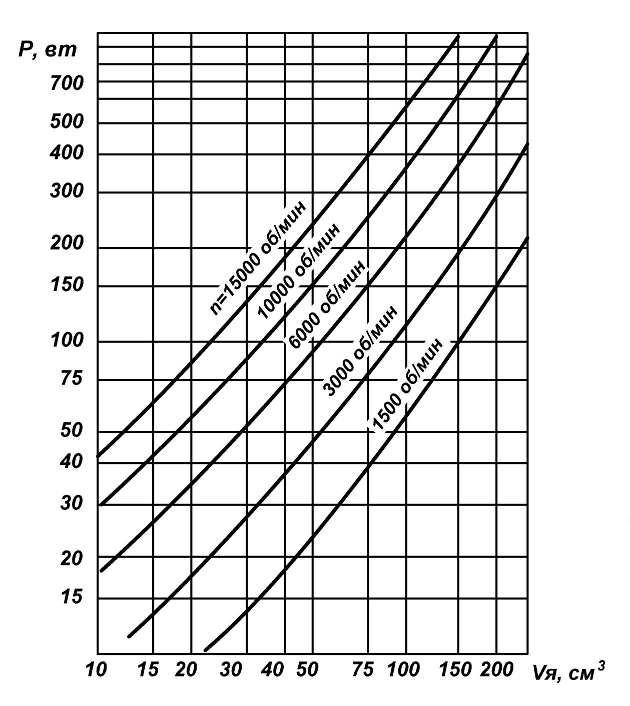


Рис. 2. Зависимость мощности двигателя постоянного тока от условного объема сердечника якоря.

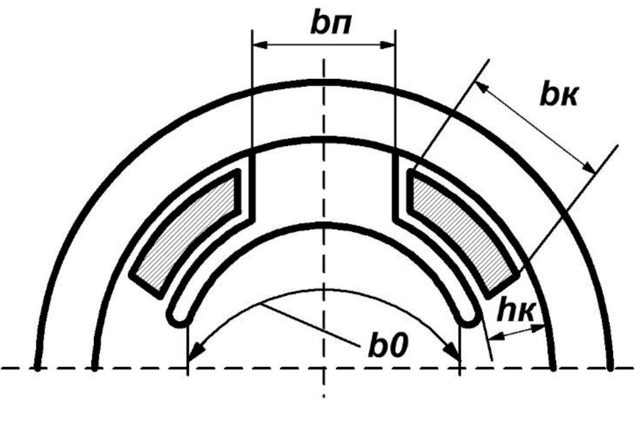


Рис. 3. Размеры полюса и обмотки возбуждения.

Число витков в секции якоря, число эффективных проводников в пазе, шаги обмотки, площадь поперечного сечения паза, заполненного обмоткой, диаметр провода, коэффициент заполнения паза определены ранее на стр. 3 и 4. Средняя длина проводника (полувитка) обмотки якоря, сантиметров. при:

$$2p = 2: \;\; l_{\text{ПВ}} \approx l_{\text{Я}} + 1{,}2 \times D_{\text{Я}}$$
$$2p = 4: \;\; l_{\text{ПВ}} \approx l_{\text{Я}} + 0{,}8 \times D_{\text{Я}}$$

Формулы для определения общей длины провода на обмотку, сопротивления обмотки якоря и массы меди провода обмотки приведены на стр. 4.

Число витков на полюс при *параллельном* возбуждении (последовательное соединение полюсных катушек):

$$w_B \approx \frac{2300 \times U}{p \times j_{\text{В}} \times l_{\text{В}}}$$

где $j_{\text{В}} = 4 \div 8$ $A/мм^2$ – плотность тока в обмотке возбуждения (бóльшие значения для машин меньшей мощности и с большей частотой вращения). $l_{\text{В}}$ – средняя длина витка полюсной катушки, *см.*, (предварительно определяем по старой катушке).

Сечение провода параллельной обмотки возбуждения, $мм^2$:

$$S_{\text{В}} = (0{,}2 \div 0{,}4) \times S_{\text{Я}}$$

где $S_{\text{Я}}$ – сечение провода обмотки якоря (число параллельных проводников $n_{\text{эл}} = 1$). Бóльшие значения числового коэффициента в скобках брать для электродвигателей меньшей мощности. Число витков на полюс при *последовательном* возбуждении:

$$w_B \approx \frac{(0{,}125 \div 0{,}5) \times N_{\text{Я}}}{2p}$$

Меньшие значения числового коэффициента в скобках принимаем для машин бóльшей мощности.

Сечение провода последовательной обмотки возбуждения, *мм*^{2}:

$$S'_В \approx 2 \times S_Я$$

Проверка размещения обмотки возбуждения на полюсе, число витков по высоте катушки:

$$m = \frac{h_К - 0{,}8}{D_B}$$

где $h_К$ – высота катушки, *мм*., по рис. 3. $D_В$ – диаметр изолированного провода обмотки возбуждения, мм., число слоев в катушке: $m' = w_В / m$, толщина катушки: $b_К = D_В \times m'$, *мм*.
Средняя длина витка полюсной катушки (*см*.) при отъемных полюсах:

$$l_{СР} = 2 \times (b_П + l_П + 2 \times b_К)$$

где $b_П$ – ширина полюса (рис. 3), *см*.; $l_П$ –длина полюса, *см*.; $b_К$ – толщина катушки.
При неотъемных полюсах: $l_{СР} = b_0 + b_П + 2 \times l_П + 2 \times b_К$
где b_0 – ширина полюсного наконечника по дуге, сантиметров. (рис 3).
Сопротивление обмотки возбуждения в нагретом (до 75°C) состоянии, *Ом*:

$$r_В = \frac{p \times w_B \times l_{СР}}{2300 \times S_В}$$

Ток в параллельной обмотке возбуждения, *А*:

$$I_m = \frac{U}{r_В}$$

Ток якоря электродвигателя ($n_{ЭЛ} = 1$), *А*:

$$I_Я = 2 \times S_Я \times j$$

где $j = 4 \div 8$ *А*/*мм*^{2} –плотность тока в обмотке якоря (бóльшие значения для машин меньшей мощности и с бóльшей частотой вращения), $S_Я$ – сечение провода обмотки якоря.
Отношение тока возбуждения в параллельной обмотке к току якоря:

$$k_В = \frac{I_Ш}{I_Я}$$

Указанное отношение находится обычно в пределах $k_В = 0{,}1 \div 0{,}2$ (бóльшие значения для машин меньшей мощности).

Пример. Рассчитать обмотки якоря и возбуждения электродвигателя постоянного тока при следующих данных: $D_Я = 3{,}6$ *см*.; $l_Я = l_П = 3{,}6$ *см*.; $b_0 = 3{,}6$ *см*.; $U = 110$ *в*; $n = 4000$ *об. мин*.; $2p = 2$; $z = 13$; $К = 26$; $r_1 = 2{,}6$ *мм*.; $r_2 = 1{,}1$ *мм*.; $h = 5{,}5$ *мм*.; $l_В = 14$ *см*.; $b_П = 13$ *мм*.; $h_К = 8$ *мм*.; охлаждение естественное, возбуждение последовательное, режим работы продолжительный.

Условный объем сердечника якоря: $V_Я = 3{,}6^2 \times 3{,}6 = 46{,}6$ см^3
Мощность электродвигателя (охлаждение естественное): $P \approx 0{,}6 \times 55 = 33$ Вт.
Индукция в воздушном зазоре: $P/n \times 10^{-3} = 8{,}25$, что соответствует 0,32 *Тл* (согласно табл. 2, при соотношении мощности к оборотам).

Магнитный поток в воздушном зазоре: $\Phi\delta = 0{,}32 \times 3{,}6 \times 3{,}6 \times 10^{-4} = 4{,}15 \times 10^{-4}$ Вб
ЭДС якоря электродвигателя: $E = 0{,}33 \times (1 + 2 \times 0{,}5) \times 110 = 73$ В.

Число проводников обмотки якоря:

$$N_{Я} = \frac{60 \times 1 \times 73}{1 \times 4000 \times 4{,}15 \times 10^{-4}} = 2640$$

($10^{-4} = 0{,}0001$)

Число витков в секции якоря:

$$w_{С} \approx \frac{2640}{2 \times 26} \approx 51$$

Уточненное число проводников обмотки якоря: $N_{Я} = 51 \times 2 \times 26 = 2650$
Число эффективных проводников в пазе:

$$N_{П} = \frac{51 \times 2 \times 26}{13} = 204$$

При $2p = 2$ двигатели постоянного тока выполняются с простой петлевой обмоткой на якоре.

Шаги обмотки:

$$y = y_{К} = 1$$

$$y_z = \frac{z}{2p} - \varepsilon = \frac{13}{2} - \frac{1}{2} = 6$$

$$y_1 = y_Z \times u = \frac{6 \times 26}{13} = 12 \quad y_2 = y_1 - 1 = 12 - 1 = 11$$

Площадь поперечного сечения паза:

$$F = 1{,}57 \times (2{,}6^2 + 1{,}1^2) + (2{,}6 + 1{,}1) \times 5{,}5 = 32{,}8 \text{ мм}^2$$

Периметр паза:

$$П = 2 \times 3{,}14 \times 2{,}6 + 3{,}14 \times 1{,}1 + 2 \times 5{,}5 = 30{,}8 \text{ мм.}$$

Площадь поперечного сечения пазовой коробки:

$$F_{КОР} = 0{,}25 \times 30{,}8 = 7{,}7 \text{ мм}^2$$

где $b_{ИЗ}$ – 0,25 *мм*. (один слой лакоткани ЛШС толщиной 0,1 *мм*. и один слой электрокартона толщиной 0,15 *мм*.). Площадь сечения пазового клина и изоляционной прокладки между слоями:

$$F_{КЛ} \approx 3 \times 2{,}6 = 7{,}8 \text{ мм}^2$$

Площадь поперечного сечения паза, заполненного обмоткой:

$$F_0 = 32{,}8 - 7{,}7 - 7{,}8 = 17{,}3 \text{ мм}^2$$

Диаметр изолированного провода:

$$D_{ИЗ} = 0{,}86 \times \sqrt{\frac{17{,}3}{204 \times 1}} = 0{,}245 \text{ мм.}$$

Диаметр провода без изоляции (марка ПЭВ–2) $d = 0{,}20$ *мм*.; $D = 0{,}24$ *мм*. Сечение провода $S_{П} = 0{,}0314$ *мм*^{2}.

Коэффициент заполнения проводниками свободной площади паза:

$$k_З = \frac{204 \times 0{,}24^2}{17{,}3} = 0{,}68 \ < \ 0{,}75$$

Средняя длина проводника (при $2p$ = 2): $l_{ПВ} = 3{,}6 + 1{,}2 \times 3{,}6 = 7{,}9$ см.

Общая длина провода на обмотку: $L = 2650 \times 7{,}9 \times 1 = 20900$ см.

Сопротивление обмотки якоря при 20°С:

$$r_Я = \frac{20900}{5700 \times 0{,}0314 \times (2 \times 1)^2} = 29{,}2 \text{ Ом}$$

Масса меди провода обмотки якоря: $M = 8{,}9 \times 20900 \times 0{,}0314 \times 10^{-5} = 0{,}058$ кг.

Число витков обмотки возбуждения на полюс:

$$w'_B = \frac{0{,}3 \times 2650}{2} \approx 400$$

Сечение провода обмотки возбуждения: $S'_В = 2 \times 0{,}0314 = 0{,}063$ мм^2
Ближайший стандартный номинал диаметра провода без изоляции обмотки возбуждения: d_B = 0,28 *мм*.; сечение провода: $S_В$ = 0,0616 *мм*^{2}.
Диаметр провода с изоляцией обмотки возбуждения (марка ПЭВ–2) $D_В$ = 0,33 *мм*.
Проверка размещения обмотки возбуждения на полюсе:

$$m = \frac{8 - 0{,}8}{0{,}33} \approx 22; \ m' = \frac{400}{22} \approx 18; \ b_К = 0{,}33 \times 18 = 6{,}0 \text{ мм.}$$

Средняя длина витка полюсной катушки (дли отъемных полюсов):

$$l_В = 2 \times (1{,}3 + 3{,}6 + 2 \times 0{,}6) \approx 12 \text{ см.}$$

Ток якоря электродвигателя: $I_Я = 2 \times 0{,}0314 \times 7 = 0{,}44$ А

3. Расчет обмоток коллекторного микродвигателя для работы от сети переменного тока (для продолжительного режима работы).

Данные для определения условного объема сердечника якоря, мощности электродвигателя, индукции в воздушном зазоре и магнитного потока были приведены на стр. 2 и 5. Мощность для двигателей переменного тока: $P_{ПЕР}$ = 0,5 ÷ 0,7 × P, где P – мощность двигателя постоянного тока. Бóльшие значения коэффициента в скобках указаны для электродвигателей бóльшей мощности.
ЭДС якоря электродвигателя:

$$E = \frac{2 + \eta}{4} \times U$$

где U – номинальное напряжение, В; η – КПД (по табл. 4).

Таблица 4. КПД универсальных коллекторных двигателей при работе от сети переменного тока.

$P_{ПЕР}$, *Вт*	η
10	0,35
20	0,43
40	0,5
100	0,55
400	0,63
1000	0,7

Число эффективных проводников обмотки якоря:

$$N_Я = \frac{85 \times a \times E}{p \times n \times \Phi\delta}$$

где, a = 1 – число параллельных ветвей; p – число пар полюсов. Число витков в секции якоря, число эффективных проводников в пазе, шаги обмотки, площадь трапецеидального паза без изоляции, диаметр провода, коэффициент заполнения паза, средняя длина проводника, общая длина провода на обмотку, сопротивление обмотки якоря и масса меди провода обмотки якоря указаны в предыдущих параграфах. Число витков последовательной обмотки возбуждения на полюс:

$$w_В = \frac{N_Я}{2a} \times K_Т$$

где $K_Т$ – коэффициент трансформации:

при $2p$ = 2: $K_Т$ = 0,10 – 0,25, при $2p$ = 4: $K_Т$ = 0,05 – 0,10.

Сечение провода обмотки последовательного возбуждения: $S_В = 2 \times S_Я$
Формулы для определения диаметра провода, средней длины витка (полюса у коллекторных микроэлектродвигателей неотъемные) и проверка размещения обмотки возбуждения даны в §2.

Пример. Рассчитать обмотки якоря и возбуждения коллекторного микродвигателя переменного тока при следующих данных: $D_Я$ = 5 *см.*; $l_Я = l_П$ = 4 *см.*; b_0 = 5,8 *см.*; U = 110 *в*; n = 3000 *об. мин.*; $2p$ = 2; z = 13; K = 39; r_1 = 3,1 *мм.*; r_2 = 1,8 *мм.*; h = 8,2 *мм.*; $b_П$ = 27 *мм.*; $h_К$ = 9,5 *мм.*; охлаждение естественное.

Условный объем сердечника якоря: $V_Я = 5^2 \times 4 = 100 \text{ см}^3$.
Мощность для двигателя постоянного тока (по рис. 2, охлаждение естественное):

$$P \approx 0{,}6 \times 115 = 69 \text{ Вт.}$$

Мощность для двигателя переменного тока: $P_{ПЕР} \approx 0{,}6 \times 69 = 41$ Вт.
ЭДС якоря:

$$E = \frac{2 + 0{,}5}{4} \times 110 = 69 \text{ В, где } \eta = 0{,}5 \text{ – по табл. 4.}$$

Магнитный поток в воздушном зазоре: $\Phi\delta = 0{,}34 \times 5{,}8 \times 4{,}0 \times 10^{-4} = 7{,}9 \times 10^{-4}$ *Вб*
где $B\delta$ = 0,34 *Тл*, при отношении $P/n = 41/3000 \times 10^{-3} = 13{,}7$ что соответствует 0,34 *Тл* (по табл. 2).
Число эффективных проводников обмотки якоря:

$$N_Я = \frac{85 \times 1 \times 69}{1 \times 3000 \times 7{,}9 \times 10^{-4}} = 2470$$

Число витков в секции якоря:

$$w_С = \frac{2470}{2 \times 39} = 32$$

Число эффективных проводников в пазе:

$$N_{\text{П}} = \frac{2 \times 32 \times 39}{13} = 192$$

Число эффективных проводников обмотки якоря (уточненное):

$$N_{\text{Я}} = 192 \times 13 = 2496$$

Шаги простой петлевой обмотки по пазам и коллектору:

$$y_Z = \frac{z}{2p} - \varepsilon = \frac{13}{2} - \frac{1}{2} = 6$$

$$y_1 = y_Z \times u = \frac{6 \times 39}{13} = 18 \qquad y_2 = y_1 - 1 = 18 - 1 = 17$$

Площадь поперечного сечения паза:

$$F = 1{,}57 \times (3{,}1^2 + 1{,}8^2) + (3{,}1 + 1{,}8) \times 8{,}2 = 60{,}4 \text{ мм}^2$$

Периметр паза: $\text{П} = 6{,}28 \times 3{,}1 + 3{,}14 \times 1{,}8 + 2 \times 8{,}2 = 41{,}6$ мм.

Площадь поперечного сечения пазовой коробки:

$F_{\text{КОР}} = 0{,}25 \times 41{,}6 = 10{,}4$ мм.. где $b_{\text{ИЗ}} = 0{,}25$ *мм*.

Площадь сечения пазового клина и изоляционной прокладки между слоями:

$$F_{\text{КЛ}} \approx 4 \times 3{,}1 = 12{,}4 \text{ мм}^2$$

Площадь поперечного сечения паза, заполненного обмоткой:

$$F_0 = 60{,}4 - 10{,}4 - 12{,}4 = 37{,}6 \text{ мм}^2$$

Диаметр изолированного провода:

$$D_{\text{ИЗ}} = 0{,}86 \times \sqrt{\frac{37{,}6}{192 \times 1}} = 0{,}38 \text{ мм.}$$

где $n_{\text{эл}} = 1$– число элементарных проводников. Выбираем провод ПЭВ–2; $d = 0{,}315$ *мм*., $D = 0{,}365$ *мм*. (согласно стандартам); $S_{\text{Я}} = 0{,}0779$ *мм²*.
Коэффициент заполнения паза изолированными проводниками не проверяем, так как выбран провод меньшего диаметра, чем полученный по расчету. Средняя длина проводника (полувитка) обмотки якоря:

$$l_{\text{ПВ}} = 4 + 1{,}2 \times 5 = 10 \text{ см.}$$

Общая длина провода на обмотку: $L = 2496 \times 10 \times 1 = 24960$ см.

Сопротивление обмотки якоря при 20°С:

$$r_{\text{Я}} = \frac{24960}{5700 \times 0{,}0779 \times (2 \times 1)^2} = 14{,}1 \text{ Ом.}$$

Масса меди провода обмотки якоря: $M = 8{,}9 \times 24960 \times 0{,}0779 \times 10^{-5} = 0{,}173$ кг.

Число витков последовательной обмотки возбуждения на полюс:

$$w_B = \frac{2496}{2} \times 0{,}15 = 187$$

Сечение провода обмотки возбуждения:

$$S_B = 2 \times 0{,}0779 = 0{,}156 \text{ мм}^2$$

$d_{\text{В}}$ = 0,45 мм; $D_{\text{В}}$ = 0,51 мм; $S_{\text{В}}$ = 0,159 мм^2

Проверка размещения обмотки возбуждения на полюсе:

$$m = \frac{9{,}5 - 0{,}8}{0{,}51} = 17 \text{ мм.}$$

$$m' = \frac{187}{17} = 11 \text{ мм.}$$

$$b_{\text{К}} = 0{,}51 \times 17 = 8{,}7 \text{ мм.}$$

Средняя длина витка полюсной катушки (для неотъемных полюсов):

$$l_{\text{В}} = 5{,}8 + 2{,}7 + 2 \times 4 + 2 \times 0{,}87 = 18{,}2 \text{ см.}$$

Ток якоря электродвигателя: $I_{\text{Я}} = 2 \times 0{,}0779 \times 7 = 1{,}09$ А.

Якорные обмотки коллекторных машин.
Общие сведения.

Якорные обмотки коллекторных машин характеризуются следующими данными:

z – число пазов якоря;
$2p$ – число полюсов;
K - число коллекторных пластин;
$u = K/z$ – число элементарных пазов в одном реальном пазу (число элементарных пазов якоря равно числу коллекторных пластин $u = K$)
y_Z – шаг обмотки по реальным пазам;
y_1 ,y_2 - первый и второй частичные шаги;
y - результирующий шаг;
y_K - шаг по коллектору;
$2a$ - число параллельных ветвей;
ε - наименьшее дробное число, которое надо вычесть или прибавить, чтобы частное от деления числа пазов или числа коллекторных пластин на число полюсов равнялось целому числу. Шаги y выражаются в реальных (физических) пазах.

Формулы для расчета параметров основных типов обмоток приведены в табл. 5.

Шаг обмотки по реальным пазам, который надо знать для ее укладки, равен $y_Z = y_1/u$. Если y_Z – целое число, то обмотка является равносекционной, если y_Z – дробное - ступенчатой. Ступенчатые обмотки более сложны в изготовлении, поэтому их применяют в необходимых случаях (например, для улучшения коммутации машины, сокращения числа штампов в серийном производстве и т. д.).
С целью получения равносекционной обмотки сначала определяют шаг по пазам:

$$y_Z = \frac{z}{2p} \pm \varepsilon$$

а затем первый шаг:

$$y = y_Z \times u$$

Обмотка якоря должна быть симметричной, т. е. эдс и сопротивления всех ее параллельных ветвей должны быть равны. При невыполнении этого условия по обмотке якоря и щеткам будут протекать уравнительные токи, которые вызовут превышение температуры обмотки и ухудшение коммутации. Простая петлевая обмотка получается симметричной при отношении z/p, равном целому числу (таб. 6, 7). Число u у нее может быть любым (1, 2, 3, 4, ...).

В простой волновой обмотке значения z и u зависят от числа пар полюсов. Например, если p равно четному числу, то z и y должны быть нечетными числами. При $2p = 4$ простая волновая обмотка выполняется с числом $u = 1, 3, 5$ и $z = 2 \times x \pm 1$, где x - любое целое число ($x = 25, 27, 29, 31$ и т. д.). Большинство машин постоянного тока при $2p = 4$ мощностью до 100 – 200 *кВт* выполняются с простой волновой обмоткой. В старых сериях машин с целью унификации штампов для листов сердечников применялись простые волновые обмотки с "мертвой" секцией, в которых отступали от указанных выше значений z и u. В таких простых волновых обмотках число u может быть равно 2 или 4 (таб. 8).

Таблица 5. Формулы для расчета параметров основных типов якорных обмоток.

Тип обмотки	y_1	y_2	$y = y_К$	$2a$
Простая петлевая	$\frac{K}{2p} \pm \varepsilon$	$y_1 - 1$	± 1	$2p$
Петлевая двухходовая		$y_1 - 2$	± 2	$4p$
Простая волновая, А и Б начало и конец первого обхода.		$y - y_1$	$\frac{K \pm 1}{p}$	2
Сложная волновая многоходовая, А и Б начало и конец первого обхода		$y - y_1$	$\frac{K \pm m}{p}$	$2m$
Лягушачья равносекционная разрезная при $2p = 4$	$y_{2П} = y_{2В} = y_{1В} \pm m$ $y_П = y_{КП} \pm m$ $y_В = y_{КВ} = \frac{K}{p} \pm m$ $y_{КП} + y_{КВ} = \frac{K}{p}$			$4pm$

Таблица 6. Значения z, $К$, y_Z некоторых машин постоянного тока (серии П, ПН и др.) и универсальных коллекторных микродвигателей с простой петлевой обмоткой при $2p$ = 2.

z	$К$	y_Z	z	$К$	y_Z
7	7	3	13	39	6
9	27	4	14	28	6
10	10	4	14	42	6
10	20	4	14	56	7
11	22	5	18	36	8
11	33	5	18	72	9
12	12	5	20	80	10
12	24	5			

Таблица 7. Значения z, $К$, y_Z, некоторых машин постоянного тока (серии П, ПН и др.) с простой петлевой обмоткой при $2p$ = 4.

z	$К$	y_Z	z	$К$	y_Z
38	114	9	50	100	12
38	152	9	50	150	12
42	126	10	50	200	12
42	168	11	54	108	13
46	92	11	54	162	13
46	138	11	58	116	14
46	184	11	62	248	15

Например, при z = 27 и $К$ =107 обмотка выполняется с числом секций 27×4 = 108. Так как число коллекторных пластин на одну меньше числа секций, то одна секция "мертвая" - остается не присоединенной к коллектору.

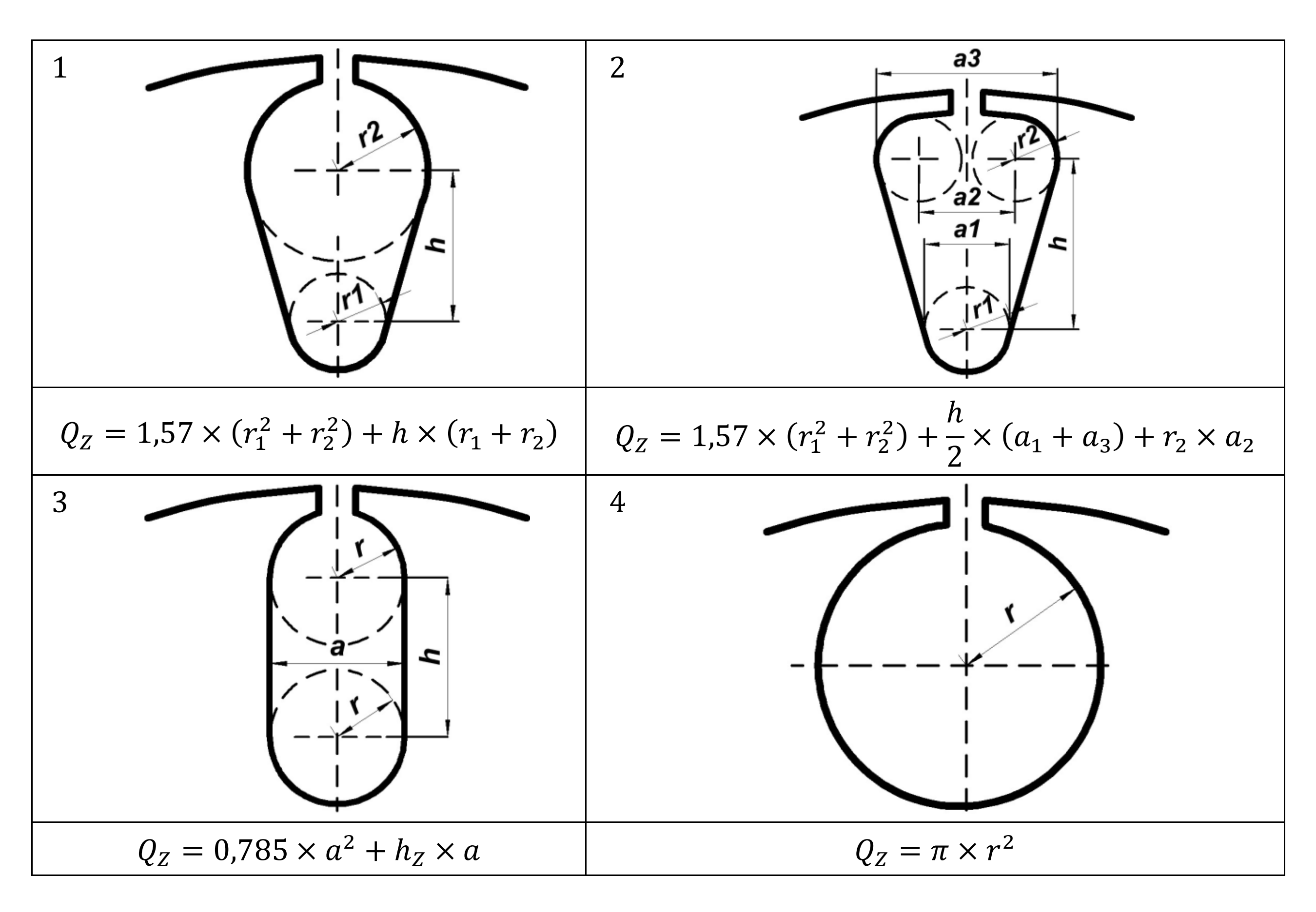
Таблица 8. Параметры некоторых простых волновых обмоток машин постоянного тока (серии П, ПН и др.) при $2p$ = 4.

z	27	27*	27	42*	42*	49	49*	49	54*	63*	63
$К$	81	107	135	125	167	147	195	245	161	125	189
y_Z	7	7	7	10	10	12	12	12	13	16	16
y_1	21	28	35	30	40	36	48	60	39	32	48
y_2	19	25	32	32	43	37	49	62	41	30	46
$y_К$	40	53	67	62	83	73	97	122	80	62	94

*обмотка имеет одну "мертвую" секцию

Более полно расчеты коллекторных двигателей приводятся в следующих изданиях:

Г. К. Жерве "Расчет машины постоянного тока при перемотке" 1952 г.
В. В. Мещеряков, И. М. Ченцов "Пересчет электрических машин и таблицы обмоточных данных" 1950 г.
А. Г. Морозов "Расчет электрических машин постоянного тока" 1972 г.



Наиболее распространенные формы пазов и формулы подсчета площади просвета паза.